

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.230>



俯冲带壳—幔相互作用的高温高压实验：对地幔不均一性成因的启示

王春光, 许文良*

吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

摘要: 使用活塞—圆筒式高温高压装置进行一系列榴辉岩部分熔融熔体与橄榄岩反应实验, 可以为深入了解俯冲带壳—幔相互作用的影响因素及地幔不均一性的成因提供重要信息. 实验使用反应偶的方法, 并在 0.8~3.0 GPa 和 1 200~1 425 °C 条件下进行. 实验结果表明, 榴辉岩部分熔融熔体—橄榄岩反应的动力学和结果受控于熔体主量元素成分、熔体中的 H₂O、温度、压力和橄榄岩的物理状态等因素. 大陆俯冲带地幔岩石中斜方辉石的富集是再循环陆壳熔体与上覆地幔反应的结果, 地幔岩石中斜方辉石岩脉的形成与含水熔体交代有关, 地幔岩石中的石榴辉石岩和石榴石岩可能形成于高压、低温条件下的熔体—橄榄岩反应.

关键词: 俯冲带; 壳—幔相互作用; 地幔不均一性; 熔体—橄榄岩反应实验; 岩石学.

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2019)12-4112-07

收稿日期: 2019-09-01

An Experimental of Crust-Mantle Interaction in Subduction Zones: Implications for Genesis of Mantle Heterogeneity

Wang Chunguang, Xu Wenliang*

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: A series of experiments reacting peridotite with melts derived from partial melting of eclogites was accomplished in order to better understand factors that control crust-mantle interaction in subduction zones. The experiments were conducted using the reaction couple method at 0.8–3.0 GPa and 1 200–1 425 °C. The experimental results show that kinetics and consequence of melt-rock reaction are controlled by factors including major element composition and H₂O in reacting melt, temperature, pressure, and physical state of reacting peridotite. Orthopyroxene enrichment in mantle beneath subduction zones is a result of interaction between melt derived from recycling continental crust and overlaying mantle. Formation of orthopyroxenite veins in mantle rocks is related to hydrous mantle metasomatism. Garnet-bearing and garnet-rich lithologies in mantle rocks were likely formed by melt-rock reaction in the low-temperature regime.

Key words: subduction zone; crust-mantle interaction; mantle heterogeneity; melt-peridotite reaction experiment; petrology.

0 引言

俯冲带是地壳物质再循环的重要场所 (Zheng

and Chen, 2016). 俯冲板片进入软流圈地幔之后, 玄武质地壳经历变质作用所形成的榴辉岩、石榴辉石

基金项目: 科技部国家重点基础研究项目 (No. 2015CB856101).

作者简介: 王春光 (1986—), 男, 副教授, 博士, 从事火成岩岩石学相关研究工作. ORCID: 0000-0002-8297-1243. E-mail: c_wang@jlu.edu.cn

* 通讯作者: 许文良 (1959—), 男, 教授, 博士, 从事火成岩岩石学相关研究工作. ORCID: 0000-0002-5129-8586. E-mail: xuwl@jlu.edu.cn

引用格式: 王春光, 许文良, 2019. 俯冲带壳—幔相互作用的高温高压实验: 对地幔不均一性成因的启示. 地球科学, 44(12): 4112–4118.

岩或角闪岩发生部分熔融,形成不同成分的熔体.这些熔体交代上覆地幔,使地幔橄榄岩发生一系列的物理、化学变化,从而造成俯冲带地幔的不均一性.例如,地幔橄榄岩捕虏体和造山带橄榄岩中辉石的富集和辉石岩脉体的存在,被认为是地幔交代作用的岩石学记录(Liu *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2008, 2010; Su *et al.*, 2019).

针对壳—幔相互作用的岩石学和地球化学过程,前人开展了大量熔体—橄榄岩反应的高温高压实验研究. Johnston and Wyllie (1989) 为模拟俯冲板片与地幔楔相互作用,在 1.5~3.0 GPa 和 850~1 150 °C 条件下,进行了一系列 H₂O 饱和花岗质熔体与橄榄岩反应的实验. 反应产生富含斜方辉石和石榴石的岩性 (opx + grt ± cpx ± phl ± qz). Yaxley and Green (1998) 和 Rapp *et al.* (1999) 为了解俯冲板片榴辉岩部分熔融产生的熔体与地幔橄榄岩反应的岩石学和地球化学过程,笔者先后在 3.5 GPa 和 3.8 GPa 条件下,进行了硅质熔体与橄榄岩反应的实验. 前者针对上涌地幔柱中的壳源熔体的再循环,实验温度较高 (1 200~1 550 °C); 而后者针对地幔楔中的交代作用,实验温度较低 (1 100 °C 和 1 150 °C). 在初始熔体/橄榄岩比例较小的情况下,熔体被反应耗尽. 当初始熔体/橄榄岩比例较高时,在低温条件下 (1 100 °C), 反应生成富含石榴石的岩性 (grt ± opx; Rapp *et al.*, 1999); 而在较高温度下 (1 250~1 450 °C), 反应生成富含斜方辉石的岩性 (opx + ol + cpx + grt), 随着温度的升高 (1 500~1 550 °C), 反应带中的石榴石不复存在 (Yaxley and Green 1998). 为了解俯冲板片脱水部分熔融的熔体对地幔楔的交代作用, Sen and Dunn (1995) 在 1.5~2.0 GPa 和 950~1 025 °C 条件下,进行了角闪石岩 (1.5% H₂O) 熔体与橄榄岩反应的实验. 结果显示无水矿物 (ol + opx + cpx + sp) 与含水熔体反应生成富含角闪石和斜方辉石的反应带.

综上所述,俯冲带榴辉岩或石榴辉石岩部分熔体,交代上覆地幔的反应过程和结果受控于诸多因素,如温度、压力、熔体主量元素成分及其是否含水. 因此,通过开展一系列熔体—橄榄岩反应的高温高压实验研究,可以系统地探究以上因素对熔体—橄榄岩反应动力学过程和结果的影响.

1 实验方法

1.1 初始成分的选择

榴辉岩和石榴辉石岩部分熔融实验研究表明,由于温度、压力条件和流体含量的不同,加之再循环榴辉岩/石榴辉石岩成分的多样性,俯冲地壳部分熔融熔体具有相当广泛的成分范围:从 SiO₂ 不饱和的苦橄质熔体 (如 Hirschmann *et al.*, 2003) 至 SiO₂ 过饱和的英安质熔体 (如 Rapp and Watson 1995) (图 1). Wang *et al.* (2013, 2015, 2016, 2019) 的实验选择上述范围内具有代表性的玄武安山质成分 (JG-26 和 Mont147; 图 1) 和玄武质成分 (JG4-1 和 D44A; 图 1) 作为反应初始熔体. 其中, JG4-1 和 JG1-26 分别为徐淮地区高镁埃达克质岩石中的角闪石榴辉石岩和片麻岩捕虏体, Mont147 来自 Montserrat 的 Soufriere 现代活动火山, D44A 为来自于东太平洋的洋中脊玄武岩. 在实验条件下所选成分全部熔融. 为避免实验过程中矿物相残留对实验的影响,实验未直接使用榴辉岩或石榴辉石岩作为初始物质. 另外, JG4-1 熔融时角闪石脱水产生 0.7% 的水, Mont147 中加入 4% 的水,用于模拟俯冲板片脱水熔融的熔体 (详见 Wang *et al.*, 2016). 初始橄榄岩为饱满的二辉橄榄岩.

1.2 实验的运行

Wang *et al.* (2013, 2015, 2016, 2019) 使用活塞—圆筒式高温高压装置进行的一系列实验采用反应偶的组装方法:将地幔端元层和地壳端元层对接,使二者反应. 富含熔体的通道内部,壳源熔体与其围岩的反应并无明确的方向性 (向上或向两侧),而且壳源熔体的密度小于地幔橄榄岩的密度. 因此,为了避免重力对熔体成分扩散的影响以及矿物掉落对地幔岩石结构的影响,将地壳端元层至于地幔端元层之上 (图 2). 这样得到的溶解速率和扩散速率亦可作为地球化学动力学模拟的参数 (Wang *et al.*, 2019). 实验的压力范围为 0.8~3.0 GPa,并结合前人 3.5 GPa 的实验研究压力对熔体—橄榄岩反应的影响. 其中 2 GPa 条件下的无水反应实验在不同温度 (1 300 °C、1 375 °C 和 1 425 °C) 下进行. 1 300 °C 条件下,二辉橄榄岩未发生部分熔融; 1 375 °C 和 1 425 °C 条件下,二辉橄榄岩部分熔融. 该组实验用于探讨橄榄岩物理状态对熔体—橄榄岩反应的影响. 无水熔体—橄榄岩反应实验使用石墨 (外套钼) 反应仓,含水熔体—橄榄岩反应实验使用金—钨合金或钨 (外

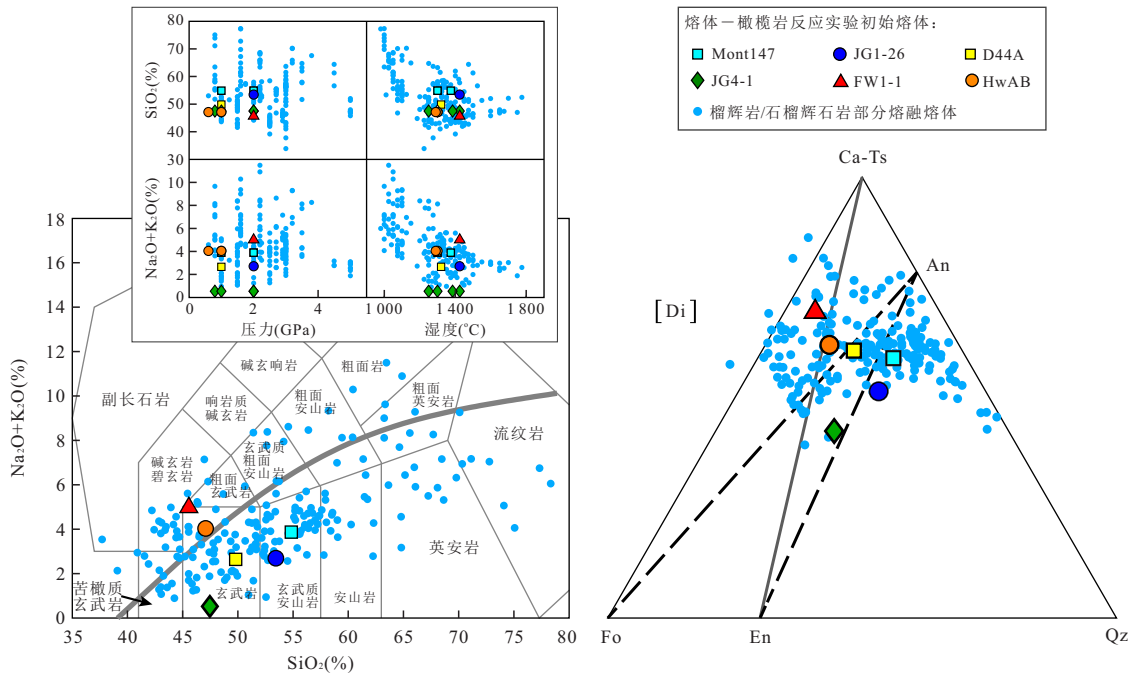


图 1 熔体-橄榄岩反应实验的初始熔体成分与不同温度、压力条件下榴辉岩/石榴辉石岩部分熔融实验得到的熔体成分对比
 Fig.1 Comparison of starting melt compositions used in melt-peridotite reaction experiments with melt compositions obtained from eclogite/garnet-pyroxenite partial melting experiments conducted at varying temperatures and pressures

据 Wang *et al.*(2013,2019)

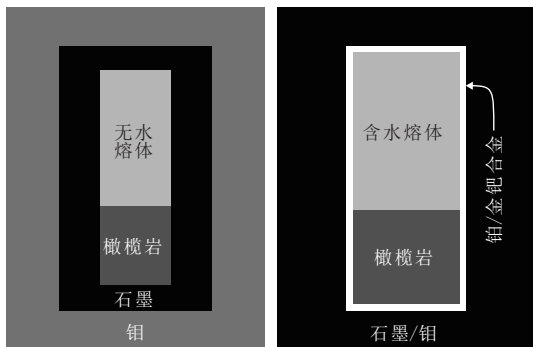


图 2 无水熔体-橄榄岩反应实验和含水熔体-橄榄岩反应实验的样品组装示意

Fig.2 Schematic diagram illustrating capsules used in the anhydrous and hydrous melt-rock reaction experiments

据 Wang *et al.*(2016)修改

套石墨或钼)反应仓(图 2)。

2 实验结果和讨论

2.1 熔体主量元素成分的影响

熔体的主量元素成分对熔体橄榄岩反应的影响主要取决于反应熔体的 SiO₂ 含量。其影响的实质

可理解为熔体液相线矿物的差异。SiO₂ 不饱和的玄武质熔体(液相线矿物为橄榄石)与橄榄岩反应,消耗熔体和辉石,生成橄榄石,将二辉橄榄岩或方辉橄榄岩转变为纯橄榄岩,形成纯橄榄岩-方辉橄榄岩(一二辉橄榄岩)序列(Morgan and Liang, 2005; Wang *et al.*, 2013)。SiO₂ 过饱和熔体(液相线矿物为斜方辉石)与部分熔融的橄榄岩反应,消耗熔体、橄榄石和单斜辉石,生成斜方辉石,形成富含斜方辉石的方辉橄榄岩(Morgan and Liang, 2005; Wang *et al.*, 2013)。

2.2 熔体 H₂O 的影响

熔体中 H₂O 的存在使反应动力学发生明显变化(Wang *et al.*, 2016)。这是因为水的存在改变了玄武质熔体-橄榄岩体系相平衡中橄榄石和斜方辉石的相对稳定区间。例如 1 200~1 385 °C, 0.8~2.0 GPa 条件下,含水(0.6%~4.0% H₂O)玄武质熔体与橄榄岩反应形成斜方辉石岩反应带;并导致橄榄岩中辉石含量减少,形成方辉橄榄岩甚至纯橄榄岩(如图 3; Wang *et al.*, 2016)。含水熔体渗入橄榄岩,使后者发生含水部分熔融。随着熔体中含水量增加,橄榄石-斜方辉石共结曲线向富硅方向转移,即橄榄石稳定域扩大,而斜方辉石稳定域缩小,因

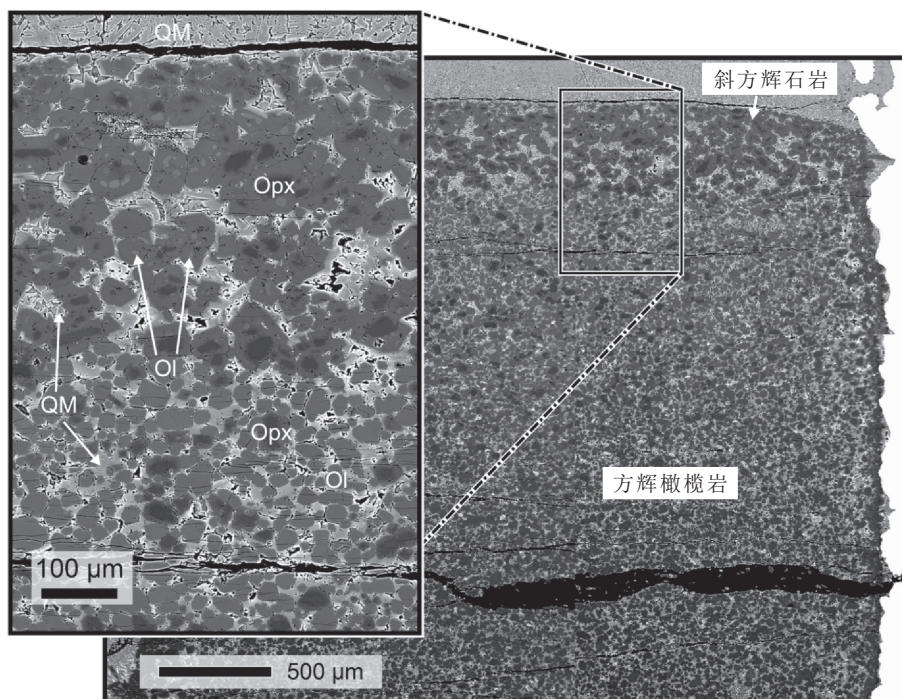


图 3 含水玄武质熔体—二辉橄榄岩反应实验(2 GPa, 1 385 °C)结果的背散射图像

Fig.3 Back-scattered electron images of the hydrous basaltic melt and lherzolite reaction experiment (2 GPa, 1 385 °C)

据 Wang *et al.*(2016); QM. 淬火熔体, Ol. 橄榄石, Opx. 斜方辉石

此橄榄岩含水部分熔融产生的熔体更加富硅, 残余体更加贫斜方辉石. 该熔体与初始熔体混合, 提高后者 SiO_2 含量. 反应界面的 SiO_2 过饱和熔体与残留橄榄岩反应, 消耗橄榄石和熔体, 生成斜方辉石. 另外, 含水初始熔体与橄榄岩含水部分熔融的熔体混合, 使得反应界面处的熔体产生明显的化学成分梯度, 斜方辉石大量结晶形成斜方辉石岩反应带 (Wang *et al.*, 2016).

此外, Wang *et al.* (2015) 在恒温恒压 (1 GPa, 1 200 °C) 含水玄武质熔体—橄榄岩反应之后, 将温度逐渐 (49 h) 降至 880 °C (反应熔体的液相线温度之下). 橄榄岩部分粒间熔体的液相线矿物结晶, 结晶次序依次为斜方辉石、单斜辉石和角闪石. 这表明, 地幔橄榄岩中的角闪石以及富含角闪石的岩脉为俯冲带含水壳源熔体交代上覆地幔的结果.

2.3 温度的影响

温度对熔体—橄榄岩反应的影响, 首先体现在反应速度上. 实验结果表明, 温度升高加快橄榄岩的溶解和新岩性的生成以及熔体和橄榄岩之间的再平衡 (Wang *et al.*, 2019). 另外, 温度控制橄榄岩的物理状态 (部分熔融与否). 橄榄岩物理状态的不同, 使反应机制发生变化 (Lo Casio, 2008; Wang *et*

al., 2019). 图 4 为 2 GPa 条件下, 不同物理状态橄榄岩与玄武安山质熔体反应实验的结果. 1 300 °C 条件下, 二辉橄榄岩未发生部分熔融, 其与熔体反应的过程以橄榄岩的均一溶解和熔体液相线矿物 (石榴石和单斜辉石) 的结晶为特征, 形成富含石榴石的反应带 (图 4a, 低温机制). 反应带石榴石的粒度和个数随反应时间增长 (Wang *et al.*, 2019). 1 375 °C 和 1 425 °C 条件下, 二辉橄榄岩发生部分熔融 (熔体含量 ~5%~7%). 其与玄武安山质熔体或玄武质熔体反应, 消耗橄榄石, 生成斜方辉石, 形成富斜方辉石的方辉橄榄岩 ($\text{opx}/\text{ol} > 1.5$; 图 4b, 高温机制). 在部分熔融条件下, 橄榄岩在熔体中的溶解速度明显高于其未发生部分熔融时的溶解速率, 前者反应速率系数比后者高出近一个数量级 (Wang *et al.*, 2019). 这是由两种反应机制中不同的动力学过程造成的: 低温反应是由成分扩散控制的单纯溶解, 而高温反应涉及强烈的溶解、结晶和重结晶过程 (Morgan and Liang, 2005; Wang *et al.*, 2013, 2019).

2.4 压力的影响

压力对榴辉岩熔体—橄榄岩反应的影响主要体现在改变体系的相平衡. 在熔体—橄榄岩体系中, 压力控制橄榄石和斜方辉石的相对稳定性. 如

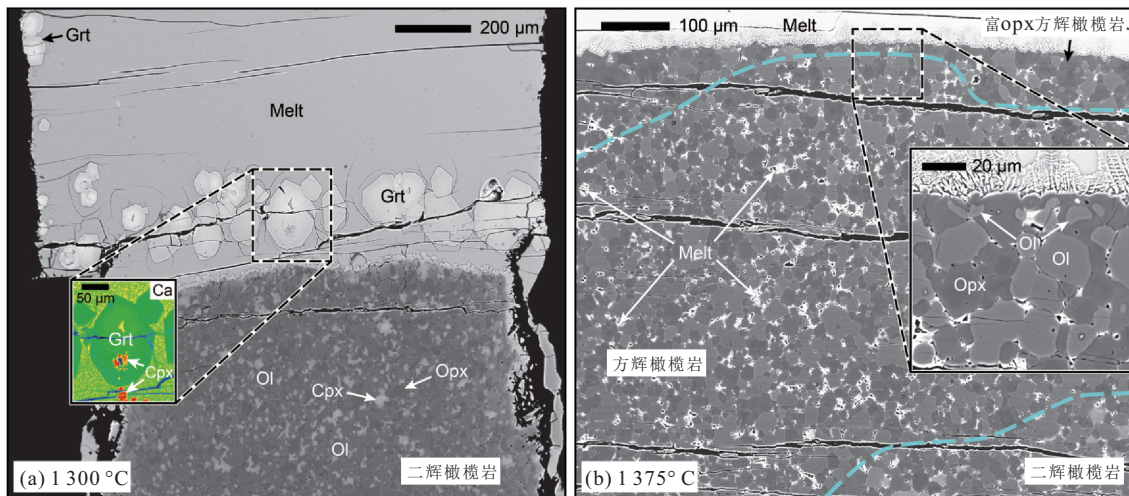


图4 玄武安山质熔体与不同物理状态的二辉橄榄岩反应实验(2 GPa)结果的背散射图像及成分扫描

Fig.4 Back-scattered electron images and element concentration maps of experiments reacting basaltic andesite with lherzolites with different physical states

a. 二辉橄榄岩未发生部分熔融(低温机制); b. 二辉橄榄岩发生部分熔融(高温机制); 据 Lo Cascio(2008)和 Wang *et al.*(2019); Grt. 石榴石; Cpx. 单斜辉石; Ol. 橄榄石; Opx. 斜方辉石; Melt. 熔体

进化的玄武质熔体与二辉橄榄岩反应,在较高压力条件下(如 ≥ 2 GPa),斜方辉石相对于橄榄石稳定,因此形成方辉橄榄岩反应带;而在较低压力条件下(0.8~1.6 GPa),橄榄石相对于斜方辉石稳定,因此形成纯橄岩反应带(Beck *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2016).更重要的是,压力升高导致熔体液相线石榴石的稳定存在.Rapp *et al.*(1999)的熔体-橄橄榄岩反应实验在3.8 GPa条件下进行,1100 °C温度下初始榴辉岩部分熔融产生富SiO₂熔体(SiO₂=66%).较高的压力和富SiO₂熔体成分特征决定了反应生成物主要由石榴石和斜方辉石组成.

3 对俯冲带地幔不均一性成因的启示

3.1 地幔岩石中斜方辉石岩的成因

华北克拉通东部陆块东缘的苏鲁造山带形成于扬子克拉通向华北克拉通之下的俯冲与碰撞.华北克拉通内部的中央造山带形成于东部陆块和西部陆块的俯冲碰撞.位于东部陆块东缘的鲁西地区和位于中央造山带的符山地区在早白垩世高镁闪长岩携带的地幔捕掳体中,橄橄榄岩常与斜方辉石岩相伴出现(Xu *et al.*, 2008, 2010; Wang *et al.*, 2018).斜方辉石岩中有含水矿物——角闪石和金云母.根据含水熔体-橄橄榄岩反应实验结果(图2).鲁西和符山的斜方辉石岩可能来自于受含水熔体改造过的岩石圈地幔.陆-陆碰撞导致陆壳加厚,加厚陆

壳重力上的不稳定必然发生拆沉——即陆壳物质再循环,由再循环陆壳物质部分熔融产生的含水熔体与橄橄榄岩发生反应.角闪石和金云母的存在暗示着含水熔体的参与(Wang *et al.*, 2015, 2016).

3.2 俯冲带岩石圈地幔斜方辉石富集的原因

除了上述斜方辉石岩,富含斜方辉石的方辉橄橄榄岩也常出现在克拉通陆块边缘或者靠近造山带的地区.例如,在接近华北克拉通北缘的阜新地区和中央造山带南部的鹤壁地区,晚白垩世和新生代玄武岩中的一些方辉橄橄榄岩捕掳体具有高Mg[#](橄橄榄石Mg[#]=92~93)和富斜方辉石(平均26%,高达34%)的特征(Zheng *et al.*, 2001, 2007).高Mg[#]可以解释为克拉通岩石圈地幔经历了熔体抽提,但是熔体抽提无法解释富斜方辉石的特征(Kelemen *et al.*, 1998).本文得出的无水榴辉岩熔体与部分熔融橄橄榄岩反应的机制(高温机制;图3b),可以很好地解释方辉橄橄榄岩中斜方辉石的富集(Lo Cascio, 2008; Wang *et al.*, 2019).陆-陆俯冲碰撞后期,加厚岩石圈的拆沉或者俯冲板片的断离导致俯冲带邻近区域岩石圈地幔的减薄.具有较高热量的再循环陆壳熔体侵蚀残余岩石圈底部,使后者发生部分熔融,并与其发生高温反应,从而导致岩石圈地幔斜方辉石的富集.

3.3 造山带橄橄榄岩中含/富石榴石岩脉的成因

造山带橄橄榄岩中常含有含石榴石或富石榴石岩脉.例如Su *et al.*(2019)报道了苏鲁超高压造山

带石榴石橄榄岩中的石榴辉石岩和石榴石岩脉. 这些岩脉(宽约 2 cm)含有 23%~53% 的大颗粒(直径 3~10 mm)高镁($Mg^{\#}=74.2\sim 77.4$)石榴石巨晶, 巨晶粒间由细粒石榴石、辉石、橄榄石和金云母填充. 此外, 含石榴石岩脉也常出现在地幔捕虏体中. 例如 Liu *et al.* (2005) 报道了华北克拉通中央造山带北端汉诺坝地区新生代玄武岩中的一套二辉橄榄岩-石榴辉石岩复合捕虏体. 石榴辉石岩以岩脉形式出现在橄榄岩中, 从寄主橄榄岩到石榴辉石岩脉, 橄榄石含量逐渐降低, 斜方辉石含量逐渐升高, 岩脉具有高 $Mg^{\#}$ 富 Ni 的特征. 这些地幔岩石中的含/富石榴石岩脉在结构和矿物成分变异上, 与本文低温机制实验及 Rapp *et al.* (1999) 实验的结果相似(图 3a), 表明这些岩脉形成于岩石圈内部再循环陆壳熔体的改造. 如前文所述, 压力升高使熔体-橄榄岩反应过程中石榴石的稳定性增强(Wang *et al.*, 2019). 苏鲁造山带石榴石橄榄岩的平衡压力为 5~6 GPa(Su *et al.*, 2019), 这也促使富石榴石岩脉在地幔交代过程中的形成.

4 结论

本文简要介绍了不同物理、化学条件下, 不同类型熔体-橄榄岩反应的高温高压实验研究, 总结了控制反应动力学和反应结果的因素. 这些实验结果表明, 俯冲带再循环陆壳熔体与地幔橄榄岩反应的动力学受控于熔体主量元素成分和 H_2O 、温度、压力以及橄榄岩的物理状态等, 为俯冲带壳-幔相互作用的深部过程以及俯冲带地幔不均一性的成因提供了重要制约. 然而, 一些涉及俯冲带壳-幔相互作用的问题尚未解决或正在探索. 例如, 熔体 H_2O 含量对反应过程产生怎样的影响, 其他俯冲带流体(如 CO_2)对反应过程具有怎样的影响, 壳-幔相互作用对矿产资源的分布有怎样的影响等. 因此, 仍需进行进一步的实验研究, 对俯冲带壳-幔相互作用的理论模型加以完善.

致谢: 相关实验研究在美国布朗大学完成, 并受到科技部国家重点基础研究项目(No. 2015CB856101)的支持, 在此表示感谢. 感谢特邀主编郑永飞教授和两位审稿人对本文提出宝贵意见与建议, 帮助提高文章质量.

References

Beck, A. R., Morgan, Z. T., Liang, Y., et al., 2006. Dunite Channels as Viable Pathways for Mare Basalt Transport

- in the Deep Lunar Mantle. *Geophysical Research Letters*, 33(1):L01202. <https://doi.org/10.1029/2005gl024008>
- Hirschmann, M.M., Kogiso, T., Baker, M.B., et al., 2003. Alkaline Magmas Generated by Partial Melting of Garnet Pyroxenite. *Geology*, 31(6):481-484.
- Johnston, A.D., Wyllie, P.J., 1989. The System Tonalite-Peridotite - H_2O at 30 kbar, with Applications to Hyperdization in Subduction Zone Magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 102(3): 190-202.
- Kelemen, P.B., Hart, S.R., Bernstein, S., 1998. Silica Enrichment in the Continental Upper Mantle via Melt/Rock Reaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 164(1): 387-406.
- Liu, Y.S., Gao, S., Lee, C.T.A., et al., 2005. Melt-Peridotite Interactions: Links between Garnet Pyroxenite and High- $Mg^{\#}$ Signature of Continental Crust. *Earth and Planetary Science Letter*, 234(1-2): 39-57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.034>
- Lo Cascio, M., 2008. Kinetics of Partial Melting and Melt-Rock Reaction in the Earth's Mantle(Dissertation). Brown University, U.S.A..
- Morgan, Z., Liang, Y., 2005. An Experimental Study of the Kinetics of Lherzolite Reactive Dissolution with Applications to Melt Channel Formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150(4):369-385. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0033-8>
- Rapp, R.P., Shimizu, N., Norman, M.D., et al., 1999. Reaction between Slab-Derived Melts and Peridotite in the Mantle Wedge: Experimental Constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4):335-356. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00106-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00106-0)
- Rapp, R.P., Watson, E.B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *J. Petrol.*, 36: 891-931.
- Sen, C., Dunn, T., 1995. Experimental Modal Metasomatism of a Spinel Lherzolite and the Production of Amphibole-Bearing Peridotite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(4): 422-432. <https://doi.org/10.1007/bf00286939>
- Su, B., Chen, Y., Guo, S., et al., 2019. Garnetite and Pyroxenite in the Mantle Wedge Formed by Slab-Mantle Interactions at Different Melt/Rock Ratios. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(4):6504-6522.
- Wang, C., Liang, Y., Xu, W., 2015. Formations of Amphibole-Gabbro and Amphibole-Bearing Peridotite through Hydrous Melt-Peridotite Reaction and In Situ Crystalliza-

- tion: An Experimental Study. Abstract 142-2 Presented at 2015 Annual Meeting, GSA, Baltimore, MD.
- Wang, C.G., Liang, Y., Dygert, N., et al., 2016. Formation of Orthopyroxenite by Reaction between Peridotite and Hydrous Basaltic Melt: An Experimental Study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171(8-9):77. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1287-z>
- Wang, C.G., Liang, Y., Xu, W.L., et al., 2013. Effect of Melt Composition on Basalt and Peridotite Interaction: Laboratory Dissolution Experiments with Applications to Mineral Compositional Variations in Mantle Xenoliths from the North China Craton. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(5): 1469-1488. <https://doi.org/10.1007/s00410-013-0938-6>
- Wang, C.G., Lo Cascio, M., Liang, Y., et al., 2019. An Experimental Study of Peridotite Dissolution in Eclogite-Derived Melts: Implications for Styles of Melt-Rock Interaction in Lithospheric Mantle beneath the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.09.022>
- Wang, C.G., Xu, W.L., Yang, D.B., et al., 2018. Olivine Oxygen Isotope Evidence for Intracontinental Recycling of Delaminated Continental Crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(7): 1913-1924. <https://doi.org/10.1029/2017gc007284>
- Xu, W., Hergt, J.M., Gao, S., et al., 2008. Interaction of Adakitic Melt-Peridotite: Implications for the High-Mg[#] Signature of Mesozoic Adakitic Rocks in the Eastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 265: 123-137. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.09.041>
- Xu, W.L., Yang, D.B., Gao, S., et al., 2010. Geochemistry of Peridotite Xenoliths in Early Cretaceous High-Mg[#] Diorites from the Central Orogenic Block of the North China Craton: The Nature of Mesozoic Lithospheric Mantle and Constraints on Lithospheric Thinning. *Chemical Geology*, 270(1-4): 257-273. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.12.006>
- Yaxley, G.M., Green, D.H., 1998. Reactions between Eclogite and Peridotite: Mantle Refertilisation by Subduction of Oceanic Crust. *Schweizerische Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen*, 78(2):243-255.
- Zheng, J.P., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., et al., 2007. Mechanism and Timing of Lithospheric Modification and Replacement beneath the Eastern North China Craton: Peridotitic Xenoliths from the 100 Ma Fuxin Basalts and a Regional Synthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(21): 5203-5225. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.07.028>
- Zheng, J.P., O'Reilly, S.Y., Griffin, W., et al., 2001. Relict Refractory Mantle beneath the Eastern North China Block: Significance for Lithosphere Evolution. *Lithos*, 57(1): 43-66. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(00\)00073-6](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(00)00073-6)
- Zheng, Y.F., Chen, Y.X., 2016. Continental versus Oceanic Subduction Zones. *National Science Review*, 3(4):495-519. <https://doi.org/10.1093/nsr/nww049>